

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.193.01  
(Д 002.110.02), СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ  
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА  
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 08.12.2021 г. № 30

О присуждении Фролову Александру Михайловичу, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Исследование молекулярного состава паров сверхтугоплавких веществ методом лазерного испарения» по специальности 1.3.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника принята к защите 05.10.2021г., (протокол заседания № 17) диссертационным советом 24.1.193.01 (Д 002.110.02), созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, (495) 485-8345, jiht.ru), утвержденного Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации № 105/нк от 11.04.2012г. (ред. 1046/нк от 15.10.2021г.).

Соискатель Фролов Александр Михайлович 1990 года рождения, в 2013 году окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)».

Работает в должности научного сотрудника лаборатории № 1.5 – Экстремальных энергетических воздействий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

В 2017 году окончил очную аспирантуру Федерального

государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)».

Диссертация выполнена в лаборатории № 1.5 – Экстремальных энергетических воздействий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Научный руководитель доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией 1.5 Экстремальных энергетических воздействий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук Шейндлин Михаил Александрович.

Официальные оппоненты:

- доктор химических наук, профессор, член-корреспондент РАН, профессор кафедры общей и неорганической химии Института Химии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Санкт-Петербургского государственного университета Столярова Валентина Леонидовна;

- доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Отдела физики высоких плотностей энергии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им.П.Н. Лебедева Российской академии наук Пикуз Сергей Александрович

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (г. Королев) в своем положительном заключении, составленном главным научным сотрудником, д.ф.-м.н., профессором Луневым В.В. (утвержденном 09.11.2021 первым заместителем генерального директора по науке, доктором технических наук Романовым А.А.) указала, что научная значимости работы обусловлена тем, что разработанный метод исследований, созданная экспериментальная

установка и модернизированные средства измерений существенно расширяют диапазон исследуемых параметров испарения сверхтугоплавких материалов. Научная новизна работы заключается в том, что впервые при высоких температурах (до 4350 К) в широком диапазоне давлений определены основные характеристики сублимации пирографита, а также получены первые экспериментальные данные по испарению карбидов гафния и циркония при температурах свыше 3700 К.

Результаты работы могут быть использованы в научных организациях Российской академии наук, а также в организациях аэрокосмической отрасли (АО «ЦНИИМАШ», ФГУП «ЦАГИ», АО «ВПК «НПО Машиностроения», ПАО «РКК «Энергия», АО «НПО Лавочкина» и др.).

Соискатель имеет 3 опубликованных работы по теме диссертации в реферируемых журналах из списка ВАК, 20 тезисов в сборниках трудов конференций:

1. *Вервикишко П.С., Фролов А.М., Шейндлин М.А. Анализ компонент паров карбида циркония при температурах выше 3500 К // Физическое образование в ВУЗах. 2016. Т. 22, № 1С. Р. 86С-87С.*
2. *Бгашева Т.В., Вервикишко П.С., Фролов А.М., Шейндлин М.А. Кристаллизация углерода из пара при давлениях до 0,6 ГПа // Физическое образование в ВУЗах. 2016. Т. 22, № 1С. Р. 88С-90С.*
3. *Belyaev G.E. et al. Detection of trace impurities by time-of-flight mass spectrometry with laser-induced evaporation // High Temp. 2017. Vol. 55, № 1. Р. 57–62. (Беляев Г. Е., Васин А. А., А. В. Лисицин А. В., Фролова А. М., Шейндлин М. А. Использование времяпролетной масс-спектрометрии с лазерно-индуцированным испарением для детектирования малых примесей // ТВТ. 2017, т. 55, в. 1, с. 61–67.)*

На диссертацию и автореферат поступили два отзыва:

1. **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Металлургии и Материаловедения РАН** (зав. Аналитической

лабораторией д.т.н. Казенас Евгений Константинович) – отзыв положительный, с замечаниями:

- в части автореферата, посвященной результатам исследования диоксида циркония не указывается влияние остаточного кислорода и воды в вакуумной камере на результаты измерений, хотя такое влияние может быть существенным.

- в автореферате автор не указывает, как получены исследуемые образцы карбидов циркония и гафния, количество примесей в образцах.

**2. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (главный научный сотрудник, профессор, д.ф.-м.н., профессор Савинов Сергей Юрьевич) – отзыв положительный, с замечанием:**

- в работе упоминается максимальная температура, при которой наблюдается насыщение сигнала масс-спектрометра при испарении пирографита. Остается неясным, является ли это значение температуры границей применимости экспериментального метода, использованного в работе.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается:

- чл.-корр. РАН, д. х. н., профессор Столярова Валентина Леонидовна является ведущим ученым в области термодинамики и высокотемпературной химии оксидных систем, а также крупным специалистом по применению высокотемпературной масс-спектрометрии для исследования испарения тугоплавких веществ и соединений.

1. Stolyarova V.L., Vorozhtcov V.A., Lopatin S.I., Shugurov S.M., Simonenko E.P., Simonenko N.P., Masaki K., Costa D. Vaporization and thermodynamics of the Cs<sub>2</sub>O–MoO<sub>3</sub> system studied using high-temperature mass spectrometry // Rapid Communications in Mass Spectrometry, Том 35, № 12, с. e9097, 2021

2. Stolyarova V.L., Vorozhtcov V.A., Lopatin S.I., Shugurov S.M., Simonenko E.P., Simonenko N.P., Masaki K., Costa D. High-temperature mass spectrometric study of vaporization and thermodynamics of the Cs<sub>2</sub>O-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system: Review and

experimental // Rapid Communications in Mass Spectrometry, Том 35, № 11, с. e9079, 2021

3. Stolyarova V.L., Vorozhtcov V.A., Masaki K., Costa D. High-temperature mass spectrometric study of thermodynamic properties in the  $UO_2$ - $ZrO_2$  system // Rapid Communications in Mass Spectrometry, Том 34, № 19, с. e8862, 2020

- д.ф.-м.н. Пикуз Сергей Александрович является признанными специалистом в области физики высоких плотностей энергии и исследованиях быстропротекающих электровзрывных процессов.

1. Pikuz S.A., Parkevich E.V., Medvedev M.A., Khirianova A.I., Ivanenkov G.V., Agafonov A.V., Selyukov A.S. Mingaleev A.R., Shelkovenko T.A., Oginov A.V. Investigation of a Near-Electrode Plasma Formed in the Atmospheric Discharge with Employment of Picosecond Laser Probing // Journal of Russian Laser Research, T. 40, с. 56-63, 2019

2. Pikuz S.A., Parkevich E.V., Medvedev M.A., Selyukov A.S., Khirianova A.I., Mingaleev A.R., Mishin S.N., Setup involving multi-frame laser probing for studying fast plasma formation with high temporal and spatial resolutions // optics and lasers in engineering, T. 116, № 1, с. 82-88, 2019

3. Pikuz S.A., Shelkovenko T.A., Tilikin I.N., Elshafiey A., Hammer D.A. Time-resolved investigation of subnanosecond radiation from Al wire hybrid X pinches // Physical Review E, T. 102, № 6, с. 063208, 2020

- Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (г. Королев) является профильной организацией, специализирующейся на проектировании концепций ракетно-космической техники, исследовании надежности и безопасности изделий ракетно-космической техники. Специалисты центра теплообмена и аэрогазодинамики осуществляют исследовательские работы по обеспечению наземной экспериментальной отработки ракетно-космической техники.

1. Кусов А.Л., Лунев В.В. О волнах разрежения при испарении материала в вакуум и малоплотную среду // Известия РАН. Механика жидкости и газов, № 2, с. 111-122, 2020
2. Кузнецов А.А., Лунев В.В. Нагрев тонкого острого клина в сверхзвуковом потоке // Известия РАН. Механика жидкости и газов, № 4, с. 115-119, 2021
3. Лунев В.В., Тихонычев П.С. Течение в узком канале с химическими реакциями на стенке. // Известия РАН. Механика жидкости и газов, № 4, с. 119-122, 2019

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

- показано, что с помощью предложенной экспериментальной методики удастся реализовать квази-свободномолекулярный режим испарения и проанализировать молекулярный состав пара исследуемых веществ в недостижимом ранее диапазоне температур – до 4500 К.

- обнаружено, что при высоких температурах сохраняется особенность испарения пиролитического графита – значительная разница в значениях парциальных давлений основных компонентов пара над базисной и призматической плоскостями. Данное отличие может быть адекватно объяснено с привлечением коэффициентов испарения, измеренных в других работах при низких температурах.

- отношения давлений основных компонентов пара углерода ( $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$ ) при максимальных температурах, достигнутых в эксперименте, в целом подтверждают результаты термодинамических расчетов в окрестности тройной точки углерода.

- обнаружено, что при испарении жидкого карбида циркония соотношение атомов углерода и циркония в паре с ростом температуры стремится к одному значению, независимо от исходного стехиометрического состава образца.

- экспериментально показано, что карбиды циркония и гафния при испарении в окрестности точки плавления, в том числе жидкой фазы, имеют

схожий молекулярный состав пара, как по представленным компонентам, так и по их соотношениям. При этом показано, что существенная доля в парах этих карбидов приходится на молекулы  $C_2$  и  $C_3$ .

- показано, что испарение диоксида циркония в окрестности точки плавления, в том числе из жидкой фазы, происходит неконгруэнтно: отношение количества атомов кислорода и циркония в паре существенно превышает это значение для конденсированной фазы.

**Теоретическая значимость исследования** обоснована тем, что:

- полученные в работе экспериментальные результаты о составе пара при сублимации базисной и призматической плоскостей пиролитического графита могут быть использованы для уточнения результатов термодинамических расчетов и моделирования испарения углерода в области вблизи точки его плавления.

- экспериментальные результаты по испарению карбидов гафния и циркония необходимы для моделирования поведения этих веществ при экстремально высоких температурах и в условиях воздействия высокоэнергетических потоков.

- используемый в работе экспериментальный метод позволяет исследовать молекулярный состав пара тугоплавких веществ в более широком по сравнению с аналогичными работами диапазоне температур.

Значение полученных соискателем результатов **исследования для практики подтверждается** тем, что:

- полученные в работе данные об испарении сверхтугоплавких карбидов циркония и гафния, а также углерода нужны для прогнозирования поведения конструкционных материалов атомной энергетики, а также теплозащитных материалов, эксплуатируемых при экстремальных тепловых нагрузках.

- полученные в работе данные о молекулярном составе пара диоксида циркония при температурах вблизи его точки плавления необходимы для

уточнения термодинамических данных о системе U-Zr-Fe-O, являющихся ключевыми для моделирования аварийных ситуаций с расплавлением активной зоны ядерного реактора.

- предложенный экспериментальный метод может быть использован для исследования испарения тугоплавких систем, для анализа выхода газообразных компонентов из конструкционных материалов, а также анализа примесного состава образцов.

Результаты работы могут быть использованы в научных и научно-образовательных центрах (НИТУ МИСиС, НИЦ «Курчатовский институт», ИМЕТ РАН, ОИВТ РАН, ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ), а также в организациях ракетной-космической и атомной отраслей, в частности, АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», АО «ЦНИИМАШ», ФГУП «ЦАГИ», АО «ВПК «НПО Машиностроения», ПАО «РКК «Энергия», АО «НПО Лавочкина».

**Оценка достоверности результатов** исследования выявила, что достоверность полученных результатов подтверждается проведением измерений на современном поверенном оборудовании, анализом погрешностей измерений, согласием результатов с экспериментальными результатами и результатами термодинамических расчетов, выполненных другими авторами. Продемонстрирована хорошая воспроизводимость результатов в сериях экспериментов с одинаковыми условиями.

**Личный вклад соискателя** состоит в определяющем участии его в разработке методики проведения эксперимента, а также методов сбора и обработки экспериментальных данных, конструировании экспериментальной установки. Автором лично проведены все эксперименты, обработаны экспериментальные данные, проведена интерпретация полученных результатов.

Апробация результатов исследования проводилась на 20 российских и международных конференциях и симпозиумах. Основные публикации по выполненной работе также подготовлены при определяющем участии автора.



В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было. Соискатель Фролов Александр Михайлович согласился с замечаниями, ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию и обоснования.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям пункта 9, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г.

На заседании от 08.12.2021г. диссертационный совет принял решение присудить за решение научной задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний, либо новые научно обоснованные технические, технологические или иные решения и разработки, имеющие существенное значение для развития страны, присудить Фролову Александру Михайловичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника;

При проведении тайного голосования Диссертационный совет в количестве 23 человек, из них очно: 6 докторов наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 6 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, дистанционно: 4 доктора наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 7 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, участвовавших в заседании, из 30 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 23, против 0, недействительных бюллетеней - 0.

Зам. председателя диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)

д.ф.-м.н., профессор

 Андреев Н.Е.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)

д.ф.-м.н.

 Васильев М.М.

08.12.2021 г.

